

Caracterização em Temperatura de Dispositivos Emissores para Emprego em ONUs

Luiz Fernando Henning,^{1,2} Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro³ e Alexandre de Almeida Prado Pohl²

Resumo— Componentes optoeletrônicos de baixo custo para aplicação em redes ópticas passivas têm sido motivo de crescente interesse e investigação nos últimos anos. Entre eles destacam-se os dispositivos emissores em encapsulamento TO, que não possuem mecanismos de controle de temperatura. Neste trabalho apresentamos resultados de simulação e de ensaios em temperatura de dispositivos emissores do tipo Fabry Perot e RSOA. Estes resultados são úteis para o entendimento e o desenvolvimento de técnicas que podem ajudar a corrigir a variação do comprimento de onda em função de mudança de sua temperatura de operação.

Palavras-Chave— Redes Ópticas Passivas, emissores tipo Fabry-Perot e RSOA.

Abstract— Low cost optoelectronics components employed in passive optical networks have been the focus of growing interest and investigation in recent years. Among them emitters in uncooled TO packages are given special attention. In this paper we present simulation and experimental results on the temperature behavior of Fabry Perot and RSOA emitting devices. The results are useful for the understanding and development of techniques that may help to correct the wavelength drift due to the temperature variation of devices during operation.

Keywords— VCSEL, FP, DFB, RSOA, PON, ONU.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de componentes de baixo custo é considerada de grande relevância para a implementação comercial acelerada das novas NGPON2 (*Next Generation Passive Optical Networks*). A questão do custo, aliado ao desempenho técnico dos dispositivos, tem sido motivo de crescente investigação em anos recentes. Particularmente, a utilização de emissores com estruturas complexas tem sido evitada, seja pela questão do custo, seja pela questão do alto consumo de energia elétrica dos componentes [1].

O mercado oferece atualmente diversas opções de componentes optoeletrônicos de baixo custo na faixa de US\$ 50 dolares, tais como dispositivos do tipo DFB-LD (*Distributed Feedback Laser Diode*), FP-LD (*Fabry-Perot Laser Diode*), VCSEL-LD (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diode*) e RSOA (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*). Todos estes componentes podem ser usados em ONUs ditas incolores (*Optical Network Units* que operam em qualquer comprimento de onda dentro de uma determinada faixa de emissão)[2].

Estes dispositivos estão disponíveis em diferentes formatos e tamanhos em encapsulamento TO, com potência óptica de saída disponível desde centenas de μW até alguns mW . O

espectro e a potência de saída são influenciados pela geometria da cavidade, pela corrente de polarização e pela temperatura de operação. O ganho e o índice de refração do material empregado no dispositivo são dependentes da temperatura. Como não apresentam mecanismos intrínsecos de controle, a compreensão da variação do comprimento de onda emitido em função da temperatura é necessária para o desenvolvimento de técnicas externas de controle, tal como a correção da corrente de polarização, representando assim um grande desafio a ser ultrapassado [1].

Em [3] foram mostrados resultados de ensaios em temperatura realizados em dispositivos emissores do tipo DFB-LD, FP-LD e VCSEL-LD. De forma a complementar o estudo realizado, este trabalho apresenta os resultados obtidos com o emissor RSOA, uma vez que este dispositivo também tem uma potencial utilização em redes PONs. Além disso, foram realizadas simulações, a partir de um modelo teórico simplificado de um emissor FP-LD, que permitiu a comparação de valores simulados com os experimentais. Na conclusão são apresentados os resultados de todos os dispositivos ensaiados, incluindo-se os emissores VCSEL-LD e do DFB-LD [3] para efeitos de análise e comparação.

Para subsidiar a discussão no âmbito deste trabalho, a tabela I apresenta as características relevantes das fontes testadas.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DOS EMISSORES ÓPTICOS CARACTERIZADOS EM TEMPERATURA.

Característica	FP	RSOA
Modelo	C123732	18-TO-C
Fornecedor	Liverage	Kamelian
Taxa de dados	1.25Gbps	1.25Gbps
Ibias ($25^{\circ}C$)	10-150mA	10-120mA
Potência Óptica	+2dBm	+10dBm

II. FP-LD: SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A dinâmica de um emissor FP-LD monomodo travado por um sinal óptico coerente está muito bem fundamentada na literatura [4], [5]. Tal mecanismo, conhecido como efeito de bloqueio de injeção, pode ser modelado através do formalismo das equações de taxa [6].

Em geral o ganho depende da corrente de polarização (Ibias), da refletividade das faces, do ganho do material e da taxa de recombinação. Em [7] foi proposto um modelo simplificado para a compreensão da operação do FP-LD. Neste modelo a densidade de portadores de carga é assumida como sendo constante ao longo de toda região ativa do FP-LD.

¹Instituto Federal de Santa Catarina, IFSC – Jaraguá do Sul, Brasil; ²CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil e ³Instituto de Telecomunicações / Universidade de Aveiro – DETI, Portugal. E-mails: luizh@ifsc.edu.br, paulo.monteiro@ua.pt, pohl@utfpr.edu.br

Embora esta condição não seja completamente verdadeira, apresenta como vantagem uma grande economia de esforço computacional. Usando-se tal modelo, o ganho espectral do sinal ASE injetado é descrito por

$$G = T_c^2 \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}G_s)^2 + 4\sqrt{R_1R_2}G_s \sin^2 \phi}{(1 - \sqrt{R_1R_2}G_s)^2 + 4\sqrt{R_1R_2}G_s \sin^2 \phi} \quad (1)$$

sendo que T_c é a eficiência de acoplamento entre a fibra óptica e o FP-LD, R_1 e R_2 são as refletividades das faces, e G_s é o ganho para uma única passagem da luz pelo material, que é dado por

$$G_s = \exp[(\Gamma g_m - \alpha)L] \quad (2)$$

em que g_m é o ganho do material, Γ é o fator de confinamento, α são as perdas internas e L é o comprimento da região ativa. O deslocamento da fase do sinal para uma única passagem pela região ativa é dada por

$$\phi = 2\pi(\nu - \nu_o)L/\nu_g \quad (3)$$

em que ν é a frequência central do sinal ASE na entrada, ν_o é a frequência de um modo ressonante do FP-LD e ν_g é a velocidade de grupo. O ganho do material depende da densidade de portadores de carga na região ativa. Para achar a densidade de portadores de carga, a equação de estado permanente é dada por

$$\frac{I_{bias}}{eV} - R(n, T) - \frac{I_{total}}{A(T)\tau(T)I_s} = 0 \quad (4)$$

sendo que V é o volume da região ativa ($V = L \times D \times W$), D é a largura, W é a altura, e é a carga do elétron, $R(n, T)$ é a taxa total de recombinação espontânea, I_s é a intensidade de corrente da saturação, I_{total} é a intensidade de corrente total e $A(T)$ é a constante do ganho diferencial a uma dada temperatura. A intensidade de corrente da saturação é dada por

$$I_s = \frac{E}{\Gamma A(T)\tau(T)} \quad (5)$$

sendo que E é a energia do fóton. A recombinação espontânea é dada por

$$R(n, T) = an + b(T)n^2 + c(T)n^3 \quad (6)$$

em que a é um valor constante, $b(T)$ e $c(T)$ são dependentes da temperatura. O coeficiente de recombinação $b(T)$ e $c(T)$ são dados por

$$b(T) = \frac{1}{T^{1.5}} \quad (7)$$

$$c(T) = \frac{28.8 \times 10^{-40}}{E_g^2} \exp\left(-\frac{0.12E_g}{\kappa_B T}\right) \quad (8)$$

E_g é o espaçamento (gap) de energia entre bandas e κ_B é a constante de Boltzmann. Para uma densidade de portadores de carga n , o tempo de vida dos portadores é dada por

$$\tau(T) = (a + b(T)n + c(T)n^2)^{-1} \quad (9)$$

O ganho do material, g_m , depende da densidade de portadores de carga na região ativa. Usando o modelo aproximado proposto, o ganho do material é dado por

$$g_m = \frac{A(T)[n - n_o(T)]}{1 + \{[\lambda - \lambda_p(n, T)]/\Delta\lambda_D(n, T)\}^2} \quad (10)$$

sendo que $n_o(T)$ é a densidade da portadora na transparência, $A(T)$ a constante de ganho diferencial a uma certa temperatura, λ é o comprimento de onda do sinal ASE injetado, $\lambda_p(n, T)$ é o comprimento de onda para o pico de ganho e $\Delta\lambda_D(n, T)$ o ganho da largura de banda e

$$A(T) = A(T_o) + \frac{dA}{dT}(T - T_o) \quad (11)$$

$$n_o(T) = n_o(T_o) + \frac{dn_o}{dT}(T - T_o) \quad (12)$$

$$\lambda_p = \lambda_o + \frac{d\lambda_p}{dT}(T - T_o) + \frac{d\lambda_p}{dn}(n - n_{th}) \quad (13)$$

$$\Delta\lambda_D = \Delta\lambda_{D_o} + \frac{d\lambda_D}{dT}(T - T_o) + \frac{d\lambda_D}{dn}(n - n_{th}) \quad (14)$$

Simulação

As equações do modelo simplificado do FP-LD foram codificadas usando o software Matlab. Os parâmetros utilizados foram: T_c é a eficiência de acoplamento entre a fibra óptica e o FP-LD (assumida como sendo 1), R_1 e R_2 são as refletividades das faces (assumidas como 0.01 e 0.32), Γ é o fator de confinamento (assumido como 0.3), L é o comprimento da região ativa (assumido como $600\mu m$), ν é a frequência central do sinal injetado na entrada para realizar o bloqueio da injeção (assumido como 0), ν_o é a frequência de um modo ressonante do FP-LD, ν_g é a velocidade de grupo (assumido como $7.7 \times 10^7 m s^{-1}$), D é a largura da região ativa (assumida como $0.2\mu m$), W é a altura da região ativa (assumido como $2\mu m$), a é um valor constante (assumido como $1 \times 10^8 s^{-1}$), $b(T)$ é dependente da temperatura (para $T = 298K$ o valor é $b(T) = 1 \times 10^{-16} m^3 s^{-1}$), $c(T)$ também é dependente da temperatura (para $T = 298K$ o valor é $c(T) = 7.5 \times 10^{-41} m^6 s^{-1}$), $n_o(T)$ é a densidade da portadora na transparência (assumida como $0.2 \times 10^{24} m^{-3}$ quando $T = 298K$), $A(T)$ a constante de ganho diferencial a uma certa temperatura (para $T = 298K$ é assumido como $A(T) = 1.23 \times 10^{-20} m^2$), λ é o comprimento de onda do sinal injetado para realizar o bloqueio da injeção (nesta simulação $\lambda = 0$, porque são mostradas as curvas do FP-LD sem injeção) e λ_o é assumido como $1543.5nm$ para $T = 298K$, a fim de fazer coincidir as curvas teórica e prática neste ponto. O catálogo do fornecedor diz que este valor pode variar entre $1480nm$ e $1580nm$.

A temperatura do encapsulamento do dispositivo T é sempre maior que a temperatura ambiente, devido ao efeito de auto-aquecimento. Para incluir este efeito, é assumido uma resistência em série com a passagem da corrente de polarização (assumido como 5Ω), e a resistência térmica é assumida como $50^\circ C/W$

Nesta simulação $\Delta\lambda_{D_o}$ é assumido como sendo $14nm$ para $T = 298K$ e $I_{bias} = 50mA$, a fim de fazer coincidir as curvas teórica e prática neste ponto.

T_o é a temperatura de referência (assumida como $298K$). Notando as equações 10, 11 e 12, g_m (e consequentemente a potência na saída do laser) diminui com o aumento de temperatura pois $\frac{dA}{dT} < 0$ ($\approx -2 \times 10^{-23} m^2 K^{-1}$) e $\frac{dn_o}{dT} > 0$ ($\approx 4 \times 10^{21} m^{-3} K^{-1}$). Notando as equações 10 e 13, o comprimento de onda aumenta com o aumento da temperatura pois $\frac{d\lambda_p}{dT} > 0$ ($\approx 0.5nmK^{-1}$) e é muito maior que $\frac{d\lambda_D}{dn}$ ($\approx -0.1 \times 10^{-32} m^4$).

Comparação da Simulação com os Resultados Experimentais para o FP-LD

Para ser utilizada em uma rede WDM-PON é desejável que uma fonte óptica possua uma baixa dependência com a temperatura, ou deve ocorrer uma compensação desta característica de forma que o comprimento de onda de emissão da fonte permaneça fixo. Em dispositivos com encapsulamento do tipo TO (sem controle externo de temperatura), o modo mais simples de se realizar a compensação da temperatura e, consequentemente o drift em comprimento de onda, é variando a corrente de polarização, I_{Bias} . Nesta e na próxima seção são apresentadas curvas sobre o comportamento dos dispositivos FP-LD e RSOA sob o efeito da temperatura para diferentes correntes de polarização I_{Bias} , a partir das quais se pode inferir os intervalos de compensação para controle da variação em comprimento de onda.

Para a realização dos ensaios em temperatura foi utilizada uma câmara climática (Angelotoni, modelo CH340-ACS). A corrente de polarização (I_{bias}) foi ajustada usando um controlador de corrente de laser (ThorLabs, modelo LCD220) e para acoplar a corrente de Bias com o sinal AC foi utilizado um T-Bias (Mini-Circuits, modelo ZFBT-6GW). O espectro de saída foi observado usando-se um analisador de espectro óptico (OSA) (EXFO, modelo FTB-5440). O procedimento consistiu nas medidas do comprimento de onda e da potência óptica de saída em diferentes temperaturas e variando-se a corrente de polarização.

O FP-LD consiste de um ressonador óptico contendo dois espelhos com alta refletividade. Este tipo de laser não é monocromático, mas tem em sua saída uma série de linhas espectralmente coerentes (os modos longitudinais).

O valor da corrente de limiar deste laser é de aproximadamente $10mA$, mas notou-se que os modos longitudinais começam a aparecer com uma corrente de $5mA$ (sabe-se que abaixo do limiar a radiação do laser é incoerente, correspondendo ao ruído ASE). Nota-se que à medida que aumenta a corrente de polarização, os modos longitudinais vão ganhando energia, ocorrendo também o fenômeno do deslocamento do espectro para maiores comprimentos de onda (ver a figura 1).

Na figura 1, para $I_{Bias}=60mA$ nota-se que para uma variação máxima de $10dB$, existem apenas entre 3 a 5 modos que poderiam ser bloqueados e para $I_{Bias}=30mA$ apenas 2 ou 3 modos (que não fazem parte dos 7 descritos anteriormente) poderiam ser utilizados para o bloqueio da injeção. Com este comportamento em seu espectro, este modelo comercial de FP-LD possui utilização limitada em uma rede WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*)[8].

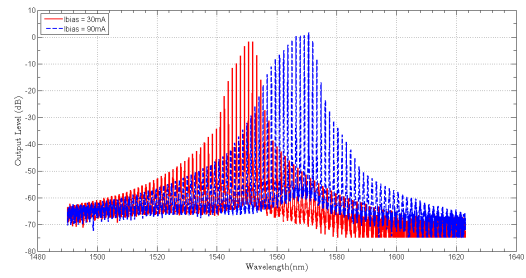


Fig. 1. Resposta espectral do FP para $I_{bias} = 30mA$ (vermelho) e $60mA$ (azul).

A figura 2 mostra as curva da variação do comprimento de onda do FP-LD em função de I_{bias} e da temperatura, onde os pontos medidos são comparados com as três curvas simuladas empregando-se o modelo teórico descrito. Nota-se que os pontos obtidos no ensaio experimental estão próximos das curvas simuladas.

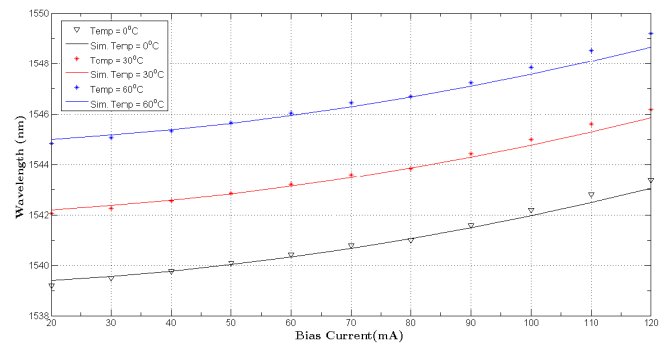


Fig. 2. Comprimento de onda x I_{bias} no FP-LD para $temp = 0^\circ C$, $30^\circ C$ e $60^\circ C$ (Simulados e medidos).

A figura 3 mostra as curvas da potência óptica de saída para o FP-LD em função de I_{Bias} e da temperatura, onde os pontos medidos são comparados com as três curvas simuladas. Nota-se que os pontos experimentais ficaram próximos dos valores simulados.

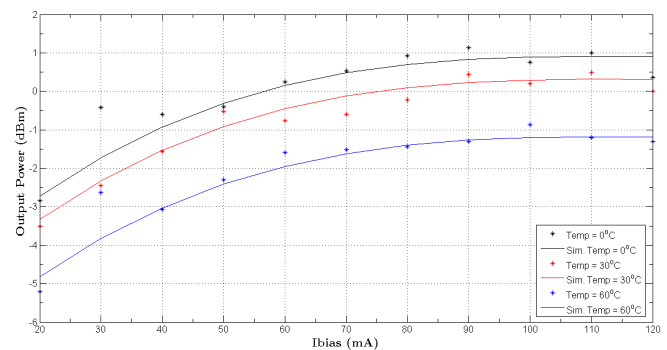


Fig. 3. Potência Óptica de Saída x I_{bias} no FP-LD para $temp = 0^\circ C$, $30^\circ C$ e $60^\circ C$ (Simulados e medidos).

III. RSOA

Ao ser polarizado com uma corrente, o RSOA possui em sua saída um espectro parecido com a de uma fonte banda larga do tipo ASE. Para correntes de polarização em torno dos $10mA$ o nível de potência é muito pequeno e fica difícil a sua utilização. Assim, este dispositivo deve ser utilizado com correntes de polarização entre $20mA$ e $75mA$. Os ensaios mostram que este RSOA pode operar em qualquer comprimento de onda entre $1530nm$ e $1565nm$, ou seja, cobre toda a Banda C do espectro óptico.

Dentro da faixa da Banda C, o RSOA, mesmo com um sinal de $-30dBm$ sendo utilizado como sinal semente, o comprimento de onda não muda com a temperatura, pois o RSOA apenas amplifica o sinal de um laser externo. Mas o ganho sofre variações. A figura 4 mostra a variação do ganho em função da potência do sinal semente para vários valores de I_{bias} .

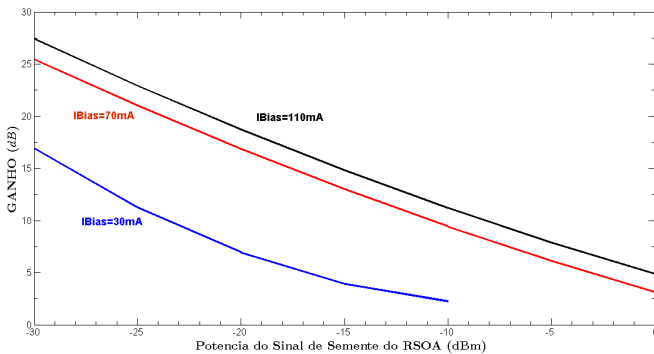


Fig. 4. Ganho do RSOA x Potência do Sinal Semente.

Como pode ser notado, até $70mA$ o ganho é fortemente influenciado por I_{bias} . Acima de $I_{bias}=70mA$ o aumento de ganho é pouco significativo. A figura 5 mostra a variação do ganho em função da temperatura para $I_{bias}=70mA$, $P_{in} = -20dBm$ e comprimento de onda de $1552nm$.

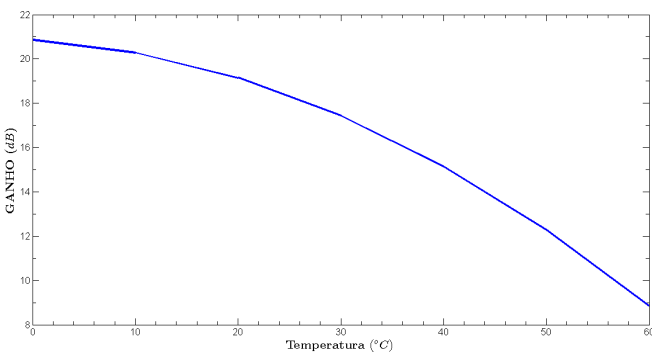


Fig. 5. Ganho do RSOA x Temperatura.

Embora o comprimento de onda da saída do RSOA dependa exclusivamente do comprimento de onda do sinal semente, o gráfico mostra que com a variação de temperatura de $0^{\circ}C$ até $60^{\circ}C$, o ganho tem uma variação de quase $12dB$.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentados os resultados de comportamento dos dispositivos FP e RSOA em função da variação de temperatura. Para o caso do FP-LD, os resultados experimentais foram comparados com resultados de simulação de um modelo teórico, verificando-se a congruência entre os mesmos.

Para efeitos de comparação os resultados obtidos com o FP-LD e o RSOA são comparados com aqueles extraídos de [3], visando sua possível utilização como emissores em ONUs incolores. Assim, a tabela II mostra um resumo de tais resultados:

TABELA II
COMPARAÇÃO ENTRE AS FONTES ÓPTICAS
CARACTERIZADAS E AS APRESENTADAS EM [3].

Característica	VCSEL	DFB	FP	RSOA
I_{limiar} (mA)	1,2	10	10	10
Máx. Potência Óptica	$500\mu W$	$5000\mu W$	$8000\mu W$	$6000\mu W$
Variação Potência Óptica vs temp.	$-6dB$	$-3dB$	$-4dB$	$-12dB$
Variação Potência Óptica vs I_{bias}	$+7dB$	$+7dB$	$+1dB$	$+20dB$
Largura de Banda	4,6GHz	3,1GHz	620MHz	620MHz
Variação Comp. onda vs. temp.	7nm	5nm	6nm	0nm
Variação Comp. onda vs I_{bias}	5nm	1nm	4nm	0nm

A partir da tabela II conclui-se que, com excessão do RSOA, todos os outros três dispositivos necessitam de uma restrição da faixa de temperatura para serem utilizados em ONUs em redes WDM-PON, pois não se consegue compensar o deslocamento do comprimento de onda devido à variação de temperatura de operação unicamente variando-se a corrente de polarização I_{bias} . O RSOA não varia o comprimento de onda devido à temperatura (apenas amplifica e modula o sinal semente recebido), mas a sua perda de ganho devido a temperatura deve ser levada em consideração no orçamento de potência do enlace óptico.

AGRADECIMENTOS

Luiz Fernando Henning agradece a CAPES pela bolsa PDSE recebida durante sua estadia no Instituto de Telecomunicações em Aveiro, Portugal.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Spren, T. Komjenovic, D. Babic, and Z. Soipuz, "Colorless optical source for fiber-optic access networks of new generation," in *ELMAR - 56th International Symposium*. Zadar: IEEE, 2014.
- [2] D. Huang, A. Lau, T. and C. Lu, S. Yan, and L. Zhou, "Chirp and Frequency offset tolerant coherent burst-mode receiver using directly modulated DFB lasers for coherent PON systems," in *ICOCN - 13th International Conference on Communications and Networks*. Suzhou: IEEE, 2014.
- [3] L. F. Henning, P. N. Monteiro, and A. A. Pohl, "Temperature and Bias Current Behavior of Uncooled Light Sources for Application in Passive Optical Networks," in *ICTON - 17th International Conference on Transparent Networks*, Budapest, 2015.
- [4] E. K. Lau, L. J. Wong, and C. Wu, "Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A Tutorial," *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 618–633, 2009.
- [5] L. Zhang, R. Dou, and J. Chen, "Characteristics of the injection-locked master-slave lasers," *Applied Optics*, vol. 47, no. 14, pp. 2648–2654, 2008.

- [6] U. R. Duarte and M. A. Romero, "Modelagem de Diodos Laser de Fabry-Perot Travados por Injecao de Sinal Optico Externo para Uso em Redes WDM-PON," Master's thesis, USP, São Carlos, 2011.
- [7] H. Meng, J.-H. Moon, K.-M. Choi, and C.-H. Lee, "Temperature-Dependent Saturation Characteristics of Injection Seeded Fabry-Perot Laser Diodes/Reflective Optical Amplifiers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 240–245, Feb 2010.
- [8] L. Deng, Y. Zhao, X. Pang, and X. Y. an J. Liu, "Colorless ONU based on all-VCSEL source with remote optical injection for WDM-PON," in *PHO - Photonics Conference*. Arlington - VA: IEEE, 2011.